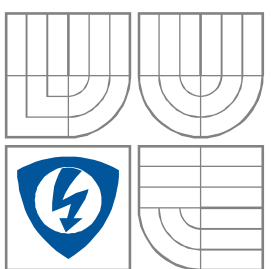


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

Ultrazvukový měřicí systém pro analýzu proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu

Ultrasonic measurement system for the analyzing of air floating around the PV module

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Ondraczka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2011

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá návrhem a realizací prototypu analogové části ultrazvukového měřicího systému pro analýzu proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu. Tento prototyp sestává z budiče, zesilovače, ultrazvukových měničů a přijímače. Práce navazuje na předchozí práci Ing. Jiřího Hofmana, kde bylo mimo jiné vytvořeno blokové schéma prototypu. Práce využívá k návrhu prototypu PSPICE, k další realizaci pak laboratorní testy. Z důvodu velkého rozsahu bude práce dále pokračovat jako diplomová práce autora.

Abstract

The work deals with development and assembly of a prototype of the analog part of ultrasonic measurement system for the analyzing of air floating around the photovoltaic module. This prototype consists of the exciter, amplifier, ultrasonic transducers and receiver. The work builds on Ing. Jiří Hofman's previous work, where was also created a prototype's block diagram. The work uses PSPICE for prototype development and laboratory tests for its assembly. Due to the scale of work will this bachelor thesis continue as the author's diploma thesis.

Klíčová slova

ultrazvuk, fotovoltaika, fotovoltaický panel, měření proudění vzduchu, účinnost fotovoltaického panelu, zesilovač, ultrazvukový měnič

Keywords

ultrasound, photovoltaics, photovoltaic panel, air floating measurement, efficiency of the photovoltaic panel, amplifier, ultrasonic transducer

Bibliografická citace

ONDRACZKA, L. *Ultrazvukový měřicí systém pro analýzu proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. 5. 2010

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Ing. Jiřímu Hofmanovi za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

Obsah

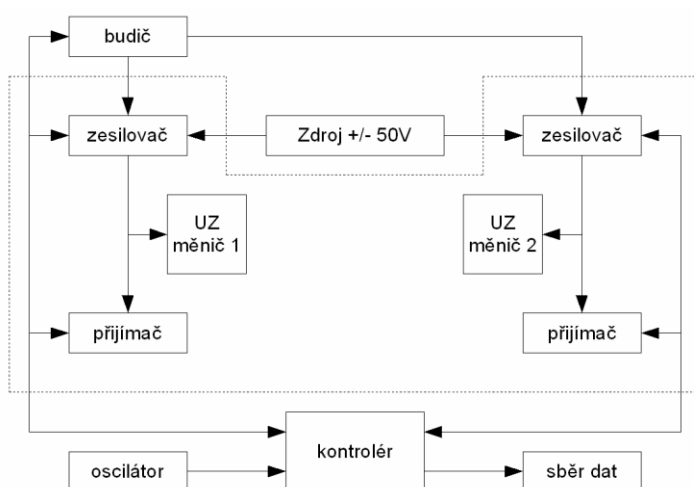
| | |
|---|----|
| Úvod | 1 |
| 1. Fotovoltaické panely | 2 |
| 1.1. Účinnost fotovoltaických panelů | 2 |
| 1.2. Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu..... | 3 |
| 2. Měření proudění vzduchu..... | 4 |
| 2.1. Anemometry na mechanickém principu..... | 4 |
| 2.2. Anemometry na tepelném principu | 4 |
| 2.3. Akustické anemometry | 5 |
| 2.4. Anemometry na aerodynamickém či optickém principu..... | 5 |
| 3. Ultrazvuk | 6 |
| 3.1. Rozdíly mezi ultrazvukovými a zvukovými vlnami | 6 |
| 3.2. Útlum ultrazvuku..... | 7 |
| 3.3. Využití ultrazvuku | 7 |
| 3.4. Využití ultrazvuku v této práci | 7 |
| 4. Ultrazvukový měřicí systém..... | 8 |
| 4.1. Základní požadavky..... | 8 |
| 4.2. Princip ultrazvukového měřicího systému | 9 |
| 5. Analogová část ultrazvukového měřicího systému | 11 |
| 5.1. Budič..... | 12 |
| 5.1.1. Software UMS | 12 |
| 5.2. Zesilovač..... | 13 |
| 5.2.1. Návrh zesilovače | 14 |
| 5.2.2. Operační zesilovač..... | 15 |
| 5.2.3. Simulace zesilovače s OPA454 v PSpice | 15 |
| 5.2.4. Simulace zesilovače s OPA547 v PSpice | 17 |
| 5.2.4. Testování zesilovačů | 18 |

| | |
|---|----|
| 5.2.5. Alternativní možné zapojení zesilovače | 19 |
| 5.3. Zdroj +/- 50 V: | 21 |
| 5.4. Ultrazvukové měniče..... | 22 |
| 5.5. Přijímač..... | 23 |
| 5.5.1. Přístrojový zesilovač | 23 |
| 5.5.2. Zdroj referenčního signálu | 23 |
| 5.5.3. Komparátor..... | 24 |
| 6. Testování zařízení..... | 25 |
| 6.1. Testování zesilovače..... | 26 |
| 6.1.1 Způsob testování..... | 26 |
| 6.1.2 Testy nezatíženého zesilovače laboratorním generátorem | 27 |
| 6.1.3 Testy zatíženého zesilovače laboratorním generátorem..... | 28 |
| 6.1.4 Testy vypnutí zesilovače | 28 |
| 6.2. Testování přenosu ultrazvukového signálu | 29 |
| 6.2.1 Měření přenosu signálu na různých vzdálenostech měničů | 29 |
| 6.2.2 Měření přenosu signálu na různých frekvencích..... | 29 |
| 6.2.3 Měření přenosu signálu pro frekvenci 41.67 kHz | 30 |
| 6.2.4 Testování vlivu proudícího větru na výstupní signál ultrazvukového měniče | 31 |
| 6.2.5 Výpočet rychlosti proudění vzduchu..... | 33 |
| 7. Možné chyby měřicího systému | 34 |
| 8. Závěr..... | 35 |
| 9. Seznam literatury | 36 |
| 10. Seznam zkratek..... | 38 |
| 11. Přílohy | 39 |
| 11.1. Simulace můstkového zapojení s OPA547 v PSpice | 39 |
| 11.2. Testy zesilovače..... | 40 |

Úvod

Práce navazuje na diplomovou práci „Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu“ [2], na projekt „Monitorovací systém vlivu proudění vzduchu na funkci fotovoltaického panelu“ [1] od Ing. Jiřího Hofmana a na semestrální projekt autora [16]. Tyto práce se zabývaly návrhem měřicího systému (MS), který by měřil, sbíral a vyhodnocoval různé parametry, které ovlivňují efektivitu fotovoltaického panelu (FP). Jednalo se o měření výkonu, klimatických podmínek a proudění vzduchu v okolí FP. Tato práce se zabývá realizací části tohoto MS, která má analyzovat proudění vzduchu v okolí FP. Jedná se o ultrazvukový měřicí systém, který bude schopen dlouhodobě a bez obsluhy sbírat data o proudění vzduchu v okolí FP. Účelem tohoto zařízení bude určení místa, na kterém bude co nejlépe proudit vzduch. Tím bude zajištěno pasivní chlazení FP.

Cílem práce je navržení analogové části tohoto ultrazvukového měřicího systému (UZMS). V [1] bylo zpracováno blokové schéma tohoto UZMS (viz Obr. 1). V této práci bude zpracován návrh jednotlivých bloků, provedeno jejich testování a postaven prototyp analogové části UZMS. Text práce sestává z šesti hlavních kapitol. První kapitola se zabývá popisem základních myšlenek fotovoltaiky, FP a jejich účinností a měřicím systémem z [2]. Druhá kapitola se zabývá různými možnostmi měření proudění vzduchu a třetí kapitola podstatou ultrazvukových vln. Čtvrtá kapitola řeší princip a požadavky na UZMS. V páté kapitole jsou rozebrány jednotlivé bloky analogové části UZMS. V šesté kapitole jsou shrnuty dosavadní výsledky testů UZMS a sedmá kapitola se zabývá zdroji a možnostmi potlačení chyb UZMS.



Obr. 1 Blokové schéma vyvíjeného hardware

1. Fotovoltaické panely

FV panel je panel tvořený FV články. FV článek je polovodičová součástka, která přeměňuje světlo na elektrickou energii. Tyto panely se využívají jako obnovitelné zdroje energie (solární energie). Momentálně je solární energie teprve v počátku a v porovnání s jinými zdroji energie je příliš drahá. Dalším problémem je, že mají omezenou dobu provozu. Stejně jako u jiných obnovitelných zdrojů ale dochází i v oblasti fotovoltaiky v poslední době k intenzivnímu vývoji a dostává se jí finanční podpory od státu. V budoucnu bude velmi pravděpodobně fotovoltaika v pozici účinného, nevyčerpatelného a ekologického zdroje energie.

1.1. Účinnost fotovoltaických panelů

Jedním z důvodů vysoké ceny solární energie je nízká účinnost FV panelů. V současnosti je průměrná účinnost komerčních FV panelů pod 20 %. Zvýšením účinnosti se samozřejmě úspěšně zabývá mnoho firem po celém světě, aktuálně například firmy Spectrolab, ZenithSolar, PVT Solar, SolarWall, nebo z tuzemska Neosolar. Tento projekt se také zabývá zvýšením účinnosti FV panelu.

V [2] byla změřena teplotní závislost účinnosti FV panelu. Z měření plyne, že účinnost s rostoucí teplotou poměrně výrazně klesá. Jedná se až o 20 % při změně z 25°C (standardní podmínky) na 65°C (při osvětlení sluncem v létě). Chlazení FV panelu by tedy mohlo výrazně zlepšit jeho účinnost. Aktivní chlazení by ale bylo bohužel příliš ekonomicky náročné. Velmi vhodné by bylo využití přebytečného tepla k ohřevu vody a vytvoření kombinace solárního kolektoru s fotovoltaickým panelem. Pokud ale chceme využít panel pouze k výrobě elektrické energie, tak je nejvhodnější možností pasivní chlazení. A právě pasivním chlazením se zabývá tento projekt, konkrétně chlazením vhodnou instalací panelu (optimálním využitím proudění vzduchu). Bude vyvinut UZMS, který bude sbírat data o proudění vzduchu v okolí panelu a umožní tedy najít ideální řešení instalace. V této práci bude navržena analogová část UZMS a zhotoven její prototyp.

1.2. Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu

Jedná se o měřicí systém, jehož návrhem a vývojem se zabývala diplomová práce [2]. Jednou z částí systému bude meteostanice pro měření energie slunečního záření (pomocí pyranometru), teploty vzduchu (pomocí inteligentního digitálního snímače teploty) a směru a rychlosti větru (pomocí anemometru). Dále bude systém sestávat z inteligentního zátěžového modulu pro měření výstupního výkonu fotovoltaického panelu. Posledními moduly budou snímače teploty povrchu FV panelu (opět inteligentní digitální snímače teploty) a UZ měřicí systém pro analýzu proudění vzduchu v okolí FV panelu. Naměřená data z těchto modulů budou přenášena do řídicího počítače (PC), kde se budou ukládat pro vyhodnocení klimatických vlivů na účinnost panelu.

2. Měření proudění vzduchu

Tato kapitola se zabývá různými možnostmi měření proudění vzduchu v technické praxi. Přístroje, které měří proudění vzduchu, se nazývají anemometry. Anemometrů je mnoho různých typů a využívají různých způsobů měření. V této kapitole budou shrnuty ty nejvyužívanější způsoby měření, do kterých mimo jiné patří i způsob měření proudění vzduchu použit v této práci.

2.1. Anemometry na mechanickém principu

Jedná se asi o nejrozšířenější typ anemometrů. Princip je ten, že vzduch uvede do pohybu určitou mechanickou konstrukci a měří její otáčky. Jedná se o velmi přesný způsob měření, ale je zatížen nevýhodami plynoucími z mechanického provedení. Jedná se například o nevýhodu setrvačnosti anemometru. Ta se projevuje setrváváním anemometru v klidu, dokud není překonáno tření ložisek hřídele (to nám určuje minimální měřitelné proudění) a setrváváním anemometru v pohybu v průběhu měření, z čehož plynou obtíže při měření nárazového větru. Dalším problémem je možné opotřebení mechanických částí anemometru.

Nejpoužívanějším typem mechanického anemometru (a zároveň anemometru obecně) je miskový anemometr. Je velmi využíván především v meteorologii a větrné energetice (k odhadu výnosu elektrárny). Tento typ by mohl být teoreticky použit i v této práci, ale vzhledem k výše uvedeným problémům a faktu, že by těchto anemometrů muselo být na měřeném FP umístěno více a zcela určitě by takto ovlivnily průběh proudění již svou konstrukcí samotnou, by se jednalo o špatnou volbu.

2.2. Anemometry na tepelném principu

Tyto anemometry měří rychlost proudění pomocí velmi tenkého drátku, který je elektricky vyhříván. Tento drátek je dále ochlazován proudícím vzduchem, což změní odpor drátku (teplotní závislost rezistivity vykazuje většina kovů, konkrétně se využívá především wolfram). Dále lze již určit závislost rychlosti proudění na odporu drátku.

V praxi je tato metoda využívána především v aplikacích, kde je měřeno nárazové, nepravidelné, či rychle se měnící proudění. Je k těmto měření dobře uzpůsobena svojí rychlou odezvou na změnu proudění. V ostatních aplikacích, i přes svou přesnost, již velmi využívaná není, a to z důvodu velké technické náročnosti této metody. Tato náročnost je daná potřebou

měřit velmi nízké veličiny (odpor tenkého drátku). Pro měření v této práci je nevhodná i svou nízkou mechanickou odolností drátku vůči klimatickým vlivům.

2.3. Akustické anemometry

Dalším způsobem měření rychlosti proudění je využití zvuku. Zvuk, jako mechanické vlnění, je samozřejmě ovlivněn prouděním vzduchu. V anemometrii se k měření užívá výhradně ultrazvuk, více k ultrazvuku je v kapitole 3. Akustický anemometr se v zásadě skládá z několika UZ měničů, kde se vyhodnocuje doba přenosu UZ signálu mezi měniči. Vzdálenost měničů je obvykle co nejmenší, a to z důvodu velkého útlumu UZ vln ve vzduchu (obvykle se jedná o vzdálenosti 10 až 20 cm). Podobně jako tepelné anemometry mají velmi dobrou odezvu na změnu proudění. Další výhodou je absence pohybujících se částí a z toho plynoucí vyšší životnost, především v prostředích s drsným klimatem. Jejich největší nevýhodou je ovlivnění proudění vzduchu svou vlastní konstrukcí.

V této práci jsou velmi vítané výhody tohoto měření proudění vzduchu. Ovlivnění proudění vzduchu konstrukcí zařízení bude značně minimalizováno využitím FP pro instalaci měničů a teoreticky by mělo být zanedbatelné. Z této instalace ovšem plyne, že vzdálenosti měničů budou na rozdíl od běžného anemometru výrazně vyšší (50 až 200 cm).

2.4. Anemometry na aerodynamickém či optickém principu

Aerodynamické anemometry využívají pro měření změn tlaku působením proudění vzduchu a optické metody využívají studii pohybu částic předem rozptýlených ve zkoumaném plynu.

Obě jsou pro tento projekt velmi nevhodné. Aerodynamické anemometry nedosahují dobré přesnosti při měření slabšího proudění vzduchu a optické vyžadují ve vzduchu rozptýlené částice, což je pro dlouhodobé měření v terénu nemožné zajistit.

3. Ultrazvuk

Ultrazvuk je akustické vlnění (tedy na mechanické podstatě) s frekvencí vyšší než 20kHz, pro člověka neslyšitelné. Ultrazvuk prochází hmotným prostředím pomocí vibrací částic - aktivované částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Částice jsou však vázány elastickými silami, takže vibrace jedné se přenášejí na sousední a tak se šíří ultrazvuková vlna prostředím. Ultrazvuk můžeme popsat těmito veličinami: akustický tlak, rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy, rychlost šíření ultrazvukové vlny a hustota prostředí. Pro podrobnější informace o ultrazvuku viz [14], nebo [15].

3.1. Rozdíly mezi ultrazvukovými a zvukovými vlnami

Hlavní rozdíl je ten, že ultrazvukové vlny nejsou neslyšitelné pro člověka. Od slyšitelného zvuku se ultrazvuk liší frekvencí. Slyšitelný zvuk dosahuje frekvencí přibližně 16 Hz až 20 kHz, ultrazvuk je na frekvencích vyšších než 20 kHz. S vyšší frekvencí f klesá, při konstantní rychlosti šíření c , vlnová délka λ (viz rovnice 1):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Z faktu, že ultrazvukové vlny mají nižší vlnovou délku, než zvukové vyplývá, že se oproti nim méně ohýbají, jsou méně absorbovány a lépe se odrážejí.

UZ a zvukové vlny mají společnou mechanickou povahu vlnění, tepelné účinky a stejnou rychlost šíření.

3.2. Útlum ultrazvuku

Intenzita UZ vlnění v prostoru je ovlivněna rozptylem vlnění, interferencí a vlastní absorpcí. K rozptylu dochází na částicích, které mají velikost srovnatelnou s vlnovou délkou. Tyto částice se potom chovají jako nesměrové zdroje ultrazvukového vlnění. Interference je jev, při kterém dochází k nekoherentnímu sečítání dvou či několika UZ vln. Při absorpci se mechanická energie přeměňuje na teplo. Od místa generování dochází tedy s rostoucí vzdáleností k poklesu intenzity.

V případě této práce je UZ signál využíván v prostředí vzduchu. Ultrazvuk se v plynech absorbuje řádově 1000krát více než v kapalinách. Na vzdálenosti UZ měničů 0,5 – 2 m je očekáván výrazný útlum.

3.3. Využití ultrazvuku

Ultrazvuk se využívá v mnoha praktických aplikacích. Například v ultrazvukové sonografii (lékařská diagnostická metoda), v ultrazvukové defektoskopii (ke kontrole kvality výrobků v průmyslu), nebo v podvodní navigaci jako sonar. Dále se ultrazvuk využívá k čištění materiálů, k obrábění materiálů, nebo i k měření (například tloušťky materiálu). Dále potom v mnoha jiných aplikacích. V této práci bude využit k analýze proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu.

3.4. Využití ultrazvuku v této práci

Práce využívá změny rychlosti akustických vln způsobené prouděním vzduchu. Ultrazvuk je využit zejména kvůli neslyšitelnosti pro člověka. Díky instalaci na panelu se budou vlny od panelu odrážet a teoreticky tak dosáhneme lepšího přenosu (UZ vlny se na rozhraní pevná látka - plyn odráží téměř dokonale). Práce počítá s poklesem intenzity UZ vln s rostoucí vzdáleností měničů.

4. Ultrazvukový měřicí systém

4.1. Základní požadavky

Požadavky na MS byly již stanoveny v Tabulce 1 v [1]. Tato tabulka zahrnuje požadavky na měřitelné rychlosti vzduchu, odolnost MS vůči poškození větrem, přesnost MS, provozní rozsahy teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku, minimální a maximální periody ukládání dat, napájení a rozměry měřeného FP. Dále je v [1] uvedeno, že by MS měl provádět kontinuální měření a ukládat průměrné hodnoty naměřené rychlosti proudění s nastavenou periodou, měl by minimálně ovlivňovat FP a měl by být schopen celoročního provozu bez obsluhy.

Další požadavky byly stanoveny v [6]. Projekt bude využívat UZ měniče 400EP18A, které budou efektivně vysílat i přijímat signály ve vzdálenostech 0,5 až 2 m. Systém bude rozšiřitelný na libovolný počet kanálů (párů UZ měničů) a bude obousměrný. Buzení zesilovačů bude zajištěno jedním blokem s DDS generátorem AD9833, který bude sdílen všemi kanály. Jakékoliv spínací prvky pro přepínání vysílání/příjem musí být čistě elektronické (předpokládá se několik desítek měřících cyklů za sekundu). Přijímače musí mít nastavitelnou citlivost (postačí trimrem), která je nutná z důvodu proměnlivé účinnosti přenosu UZ signálu vlivem různé použité vzdálenosti snímačů a různých odrazů (o fotovoltaický panel, či při testech v aerodynamickém tunelu). Výstupem přijímačů bude digitální signál kompatibilní s CMOS 3,3 V. Přijímače musí pracovat jednak v režimu příjmu UZ signálu (vstupní napětí řádově mV) a také v režimu zpětné vazby při vyslání UZ signálu (kompenzace případných zpoždění zesilovačů vlivem změny kapacity UZ měničů). Zesilovače musí být schopné stabilního provozu při velké kapacitní zátěži UZ měničů. Doporučená amplituda výstupního napětí zesilovačů je 50 V.

4.2. Princip ultrazvukového měřicího systému

UZMS patří mezi akustické metody měření rychlosti, které využívají změny rychlosti šíření zvuku vlivem proudění plynu. Konkrétně se jedná o zvuk o frekvenci 40 kHz, tedy ultrazvuk (UZ – není slyšitelný pro člověka). UZMS je založený na měření doby přenosu UZ signálů z UZ měničů. Signál bude mít zpoždění úměrné rychlosti proudění vzduchu. Pomocí vícekanálového systému bude možné toto proudění měřit a vyhodnocovat. Výsledkem bude 3D graf s výsledným vektorem proudění vzduchu.

Vlastní vyhodnocení rychlosti je vypočítáno pomocí jednoduché fyzikální rovnice popisující pohyb tělesa, a to:

$$v = \frac{s}{t} \quad (2)$$

V našem případě je v rychlost UZ v_s (sound) zvýšená nebo snížena o rychlost proudění vzduchu v_a (air), tedy:

$$v_s \pm v_a = \frac{s}{t} \quad (3)$$

Dráha s je dráha, kterou UZ urazí. Ta je rovna vzdálenosti UZ měničů l :

$$v_s \pm v_a = \frac{l}{t} \quad (4)$$

UZ měniče jsou naproti sobě, proto když bude vzduch zvyšovat rychlost UZ vysílaného prvním měničem, musí zákonitě snižovat rychlost zvuku druhého měniče. Jelikož vzdálenost UZ měničů je konstantní tak nám tato změna způsobí, že každý UZ měnič bude mít rozdílnou dobu přenosu signálu t :

$$v_s + v_a = \frac{l}{t_1} \qquad v_s - v_a = \frac{l}{t_2} \quad (5)$$

V rovnicích (5) je t_1 doba přenosu UZ z měniče, kterému proudí vzduch ve směru vysílání UZ a t_2 doba přenosu UZ z měniče, kterému proudí vzduch proti směru vysílání.

Pro rychlost proudění v_a tedy platí:

$$v_a = \frac{l}{t_1} - v_s \qquad v_a = v_s - \frac{l}{t_2} \qquad (6)$$

Rovnice sečteme:

$$2 * v_a = \frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} \qquad (7)$$

Pro rychlost proudění tedy platí:

$$v_a = \frac{1}{2} * \left(\frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} \right) \qquad (8)$$

Z rovnic výše vyplývá, že při známé vzdálenosti UZ měničů l bude UZMS měřit a vyhodnocovat přenosu signálů t_1 a t_2 , ze kterých určí rychlost proudění vzduchu v dané 1D ose která je měniči vyhodnocena. MS bude samozřejmě rozšířitelný na libovolný počet kanálů a z nasbíraných dat bude možné sestavit výsledný vektor proudění.

Práce se zabývá určením doby přenosu v laboratorních podmínkách, kde se očekává nulové proudění vzduchu. Tato doba se pro účely práce bude měřit pomocí osciloskopu, ve finální verzi UZMS bude zajištěna kontrolérem. Doby přenosu při vysílání UZ prvním měničem do druhého a naopak by při nulové rychlosti proudění vzduchu měly být stejné:

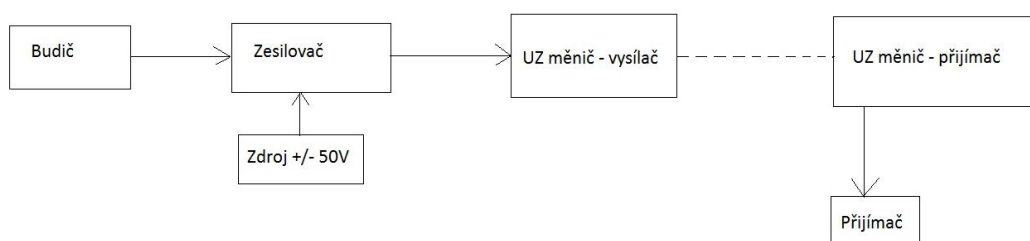
$$v_s = \frac{l}{t} \qquad (9)$$

Naměřenou dobu přenosu UZ signálu t bude možno teoreticky ověřit pomocí znalosti vzdálenosti UZ měničů l a výpočtu rychlosti vzduchu v_s podle [7]. Jedná se o poměrně složitý výpočet založený na znalosti parametrů vzduchu.

5. Analogová část ultrazvukového měřicího systému

Analogová část začíná budičem, jenž generuje signál na vstup zesilovače. Zesilovač signál z budiče zesílí na hodnotu potřebnou k vybuzení UZ měniče, který je v režimu vysílání. UZ měnič vyšle UZ signál do druhého UZ měniče, který je v režimu příjmu. Tento měnič vyšle elektrický signál na přijímač. Ten vygeneruje digitální výstupní signál, který bude dále zpracován další částí UZMS, která již není v rámci této práce. Tento signál bude tedy pro potřeby práce měřen pomocí osciloskopu.

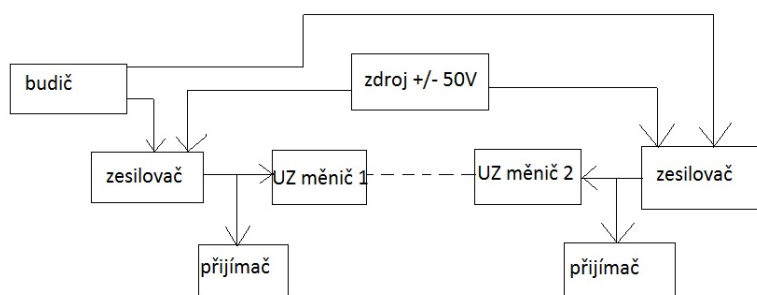
Blokové schéma tohoto systému vypadá takto:



Obr. 2 Blokové schéma analogové části UZMS v jednosměrné verzi

Tento systém je ale pouze jednosměrný, což pro určení rychlosti proudění podle (7) stačit nebude. Zařízení bude ale v tomto uspořádání využito pro testování jednotlivých bloků.

K zajištění obousměrného provozu systému doplníme schéma o další zesilovač a přijímač.



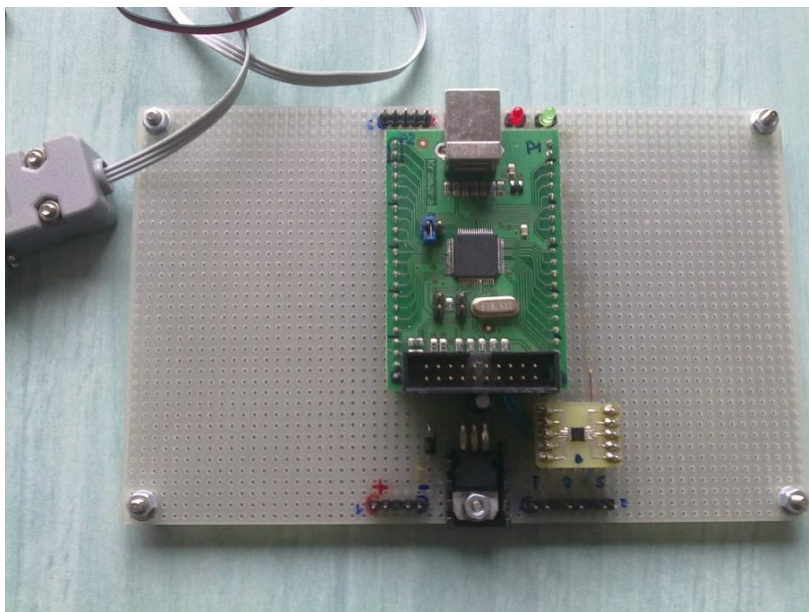
Obr. 3 Blokové schéma analogové části UZMS v obousměrné verzi

V tomto schématu již pracují UZ měniče střídavě v režimu vysílání a příjmu UZ signálu. Při testování tohoto zařízení v laboratorních podmínkách, tedy bez proudění vzduchu, by měly být naměřené doby přenosu UZ signálu stejné.

Následuje popis a návrh jednotlivých bloků.

5.1. Budič

Budič bude DDS generátor AD9833 [4] (viz Obr. 4) a bude sdílen všemi kanály (páry UZ měničů). Tento modul se připojuje na RS-232 port PC pomocí kabelu a dodává sinusový signál s amplitudou 0,65 V a frekvencí nastavenou pomocí softwaru UMS. Softwarem je možné nastavit buď kontinuální výstup, nebo výstup ve formě série pulzů, aktivován přes PC nebo tlačítkem. Frekvence, tvar signálu a případně počet pulzů lze nastavit v softwaru UMS. Ideální frekvence pro UZ měniče, udávána v [5] je 40 ± 1 kHz, a proto je tato frekvence nastavena v simulacích na 40kHz. Tato hodnota bude praktickým měřením nastavena přesněji.



Obr. 4 DDS generátor AD9833

5.1.1. Software UMS

Software UMS (Univerzální měřicí systém) je software vyvinut Ing. Jiřím Hofmanem k řízení měření a sběru dat z modulů měřicího systému. Pro potřeby modulu pro měření proudění vzduchu umožňuje tento systém ovládání DDS generátoru budiče pomocí PC.

Naměřená data jsou přenášena do řídicího počítače (PC), kde se ukládají pro vyhodnocení klimatických vlivů na účinnost panelu.

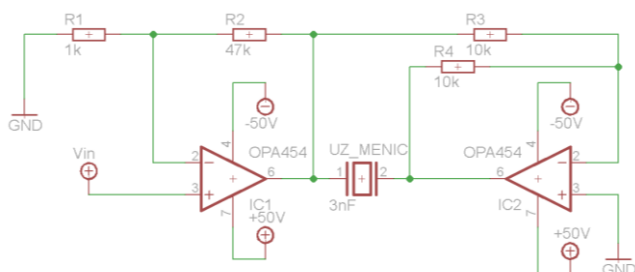
5.2. Zesilovač

Zesilovače jsou obvody, na jejichž vstup přivádíme signál, který má být zesílen a z jejichž výstupu odebíráme zesílený signál. Na rozdíl od transformátorů musí být u zesilovačů i výkonové zesílení větší než 1. Z tohoto důvodu musí být do zesilovače dodávána energie z napájecího zdroje a zesilovač musí obsahovat prvek, který energii ze zdroje přesune do výstupního signálu. Tímto prvkem je nejčastěji tranzistor nebo operační zesilovač. Podrobnější informace o zesilovačích lze nalézt v [9].

Cílem tohoto bloku je zvýšení amplitudy výstupu budiče na amplitudu potřebnou k vybuzení UZ měniče (očekává se amplituda kolem 50 V).

5.2.1. Návrh zesilovače

Zesilovač bude tvořen můstkovým zapojením dvou operačních zesilovačů podle [3].



Obr. 5 Schéma můstkového zapojení dvou operačních zesilovačů, zdroj [3]

Můstkové zapojení zesílí vstupní signál prvním zesilovačem a jeho výslednou hodnotu ještě převrátí druhým zesilovačem. Tím vytvoří vysoký rozdíl napětí, který je připojen k zátěži mezi její vstupy.

Napětí na výstupu prvního zesilovače (na schématu IC1) je dáno vztahem:

$$V_{out1} = V_{in} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (9)$$

Vidíme, že tato část můstkového zapojení funguje na principu neinvertujícího zesilovače. Změnou poměru R_2 a R_1 lze podle potřeby upravovat napěťové zesílení.

Druhá část můstkového zapojení je invertující zesilovač, který přivádí invertované napětí z výstupu prvního (neinvertujícího) zesilovače na svůj výstup. Napětí na jeho výstupu je tedy:

$$V_{out2} = -V_{out1} \quad (10)$$

Hodnotu V_{out2} lze ještě nastavit úpravou poměru R_4 a R_3 , podle vztahu:

$$V_{out2} = -V_{out1} * \frac{R_4}{R_3} \quad (11)$$

Výsledný rozdíl napětí na UZ měniči bude dán rozdílem V_{out1} a V_{out2} .

Výstupní napětí bude v našem případě podle rovnic (9) a (11) nastaveno na +/- 31 V (rozdíl potenciálu bude tedy 62 V) a může být regulováno změnou odporu R_2 . Tato hodnota bude samozřejmě v praxi o něco nižší. Testováním se bude zkoušet, jak velké výstupní napětí bude možné na měniče přivést. Kvůli vysoké kapacitě UZ měničů bude třeba získat co největší, ale takové aby nekladlo příliš velké požadavky na přijímač. Bude se tedy hledat kompromis.

5.2.2. Operační zesilovač

Operační zesilovače (OZ) se v současnosti využívají ve většině aplikací se zesilovači (až z 95 %). Podstatou funkce je podmínka nulového rozdílového napětí na vstupech při použití záporné zpětné vazby. Ta platí samozřejmě pouze v ideálním OZ, ovšem pokud nepoužíváme OZ pro příliš vysoké kmitočty či zesílení, je v praxi tato podmínka dodržována velmi přesně. Více k vlastnostem, aplikacích či historii OZ lze nalézt v [9].

Pro použití v obvodu zesilovače této práce byly zvoleny operační zesilovače OPA454 [3], nebo OPA547 [10], a to především z důvodu jejich vysokého napájecího napětí, které nám při aplikaci těchto OZ v můstkovém zapojení zajistí možné napětí na měniči až 100 V (případně 60 V při použití OPA547), a jejich možnosti nezávislého vypínání výstupu pomocí pinu Enable/Disable. Tato funkce bude užitečná při realizaci obousměrného chodu MS, kdy bude potřeba odpojit výstup pokaždé, když bude UZ měnič v režimu příjmu. Tyto OZ jsou navíc k buzení piezoelektrických krystalů doporučeny přímo výrobcem.

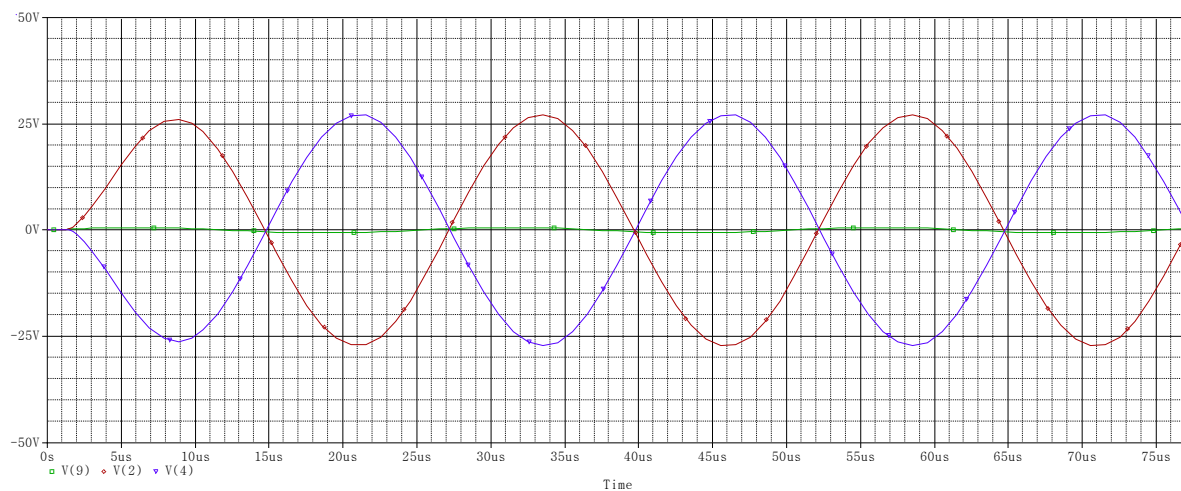
5.2.3. Simulace zesilovače s OPA454 v PSpice

Zesilovač s OPA454 (viz Obr. 5) byl simulován v PSpice, za účelem zisku představy o jeho chování v reálu, OPA454 PSpice model je dostupný z [11]:

```
Mustkove zapojeni zesilovace s opa454
*
R1 1 0 1k
R2 1 2 47k
R3 2 3 10k
R4 3 4 10k
*vstupni signal: sinusovy prubeh, nulove pocatecni napeti, amplituda 0.65V (z [4]), frekvence 40kHz
V1 9 0 sin 0 0.65 40kHz
V2 7 0 50
V3 0 8 50
V4 5 0 50
V5 0 6 50
X1 9 1 7 8 2 10 11 12 OPA454
X2 0 3 5 6 4 13 14 15 OPA454
*UZ menice jsem nahradil kondenzatorem o kapacite 3nF, na zaklade udaje v [1]
C1 4 2 3n
*uzemneni nepouzitych pinu
R5 10 0 300meg
R6 11 0 300meg
R7 12 0 300meg
R8 13 0 300meg
R9 14 0 300meg
R10 15 0 300meg
*
.lib Knihovna.lib
.TRAN 1u 100u 0 1u SKIPBP
.PROBE V(9) V(2) V(4)
*iterace jsem zadal po 5000 protoze pri vychozim nastaveni program hlasil chybu
.OPTIONS ITL1=5000 ITL2=5000 ITL4=5000
*
.end
```

Obr. 6 Zdrojový kód pro simulaci můstkového zapojení s OPA454

Výsledkem simulace byly tyto průběhy napětí:



Obr. 7 Výsledky simulace můstkového zapojení

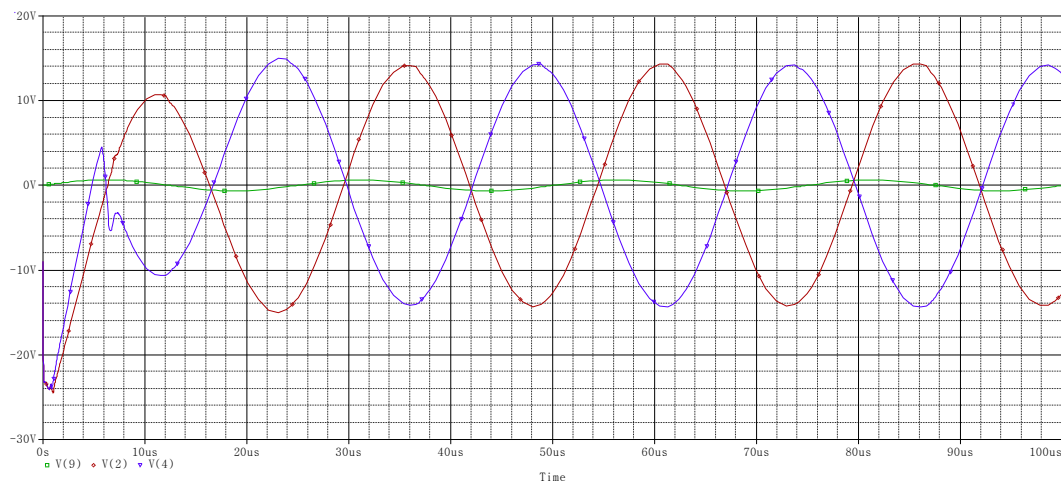
Zeleně je vstupní signál z DDS generátoru, červeně výstupní signál prvního zesilovače a modře výstupní signál druhého zesilovače.

Je vidět, že amplitudy výstupních napětí v simulaci dosahují hodnot ± 27 V. Tyto amplitudy jsou přibližně o 13 % nižší, než udávaly teoretické vztahy (9) a (11). Tento pokles oproti teoretickému výpočtu byl očekáván. Ze simulace lze usoudit, že toto zapojení zesilovače funguje a může být dál testováno.

5.2.4. Simulace zesilovače s OPA547 v PSpice

Zesilovač s OPA547 byl také simulován v PSpice, zdrojový kód simulace i schéma zapojení jsou velmi podobné těm se zapojením OPA454, proto byly umístěny do příloh (Obr. 26 a Obr. 27).

Výsledkem simulace byly tyto průběhy napětí:

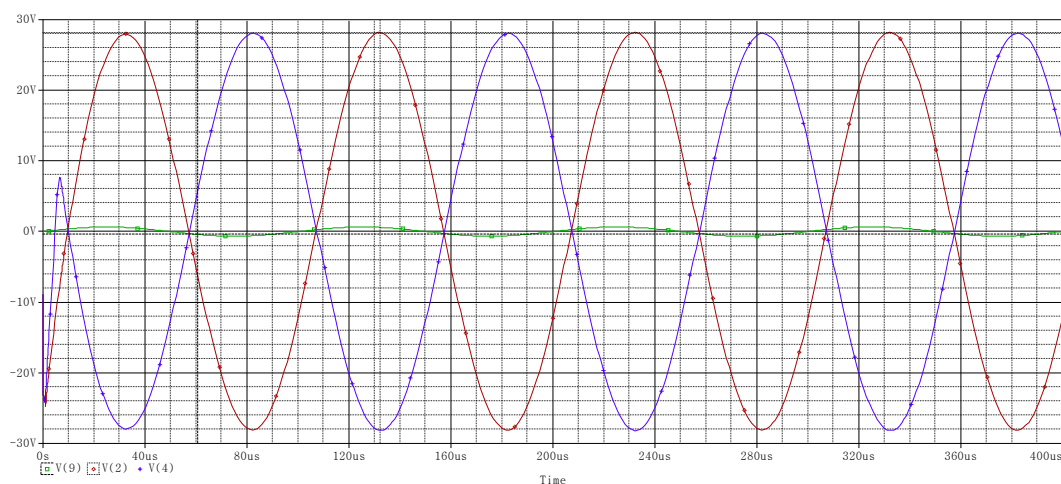


Obr. 8 Výsledky simulace můstkového zapojení

Zeleně je opět vstupní signál z DDS generátoru, červeně výstupní signál prvního zesilovače a modře výstupní signál druhého zesilovače.

Amplitudy výstupních napětí v simulaci dosahují pouze hodnot ± 14 V. Tyto amplitudy jsou přibližně o 53 % nižší, než udávaly teoretické vztahy (9) a (11). Tento pokles oproti teoretickému výpočtu je příliš velký, chyba může být v tom, že OPA547 nepracuje efektivně na frekvenci 40 kHz, proto byla provedena další simulace pro 10 kHz.

Výsledkem simulace pro vstupní signál o frekvenci 10 kHz byly tyto průběhy napětí:



Obr. 9 Výsledky simulace můstkového zapojení

Zeleně je opět vstupní signál z DDS generátoru, červeně výstupní signál prvního zesilovače a modře výstupní signál druhého zesilovače.

Amplitudy výstupních napětí v simulaci dosahují pouze hodnot $\pm 28\text{V}$. Zesilovač s použitím OPA547 je tedy zřejmě nevhodný pro použití na frekvencích 40 kHz.

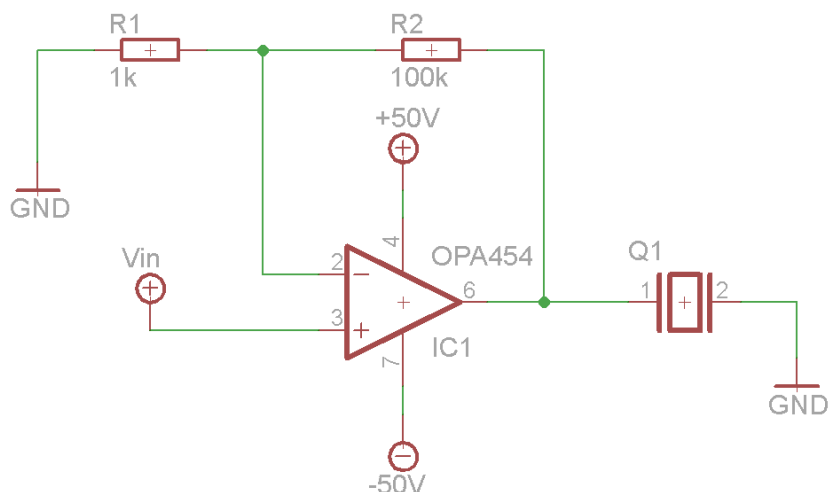
5.2.4. Testování zesilovačů

Zesilovač budou testovány laboratorním generátorem s výstupním signálem odpovídajícím signálu z DDS modulu AD9833 [4].

Stabilita zesilovačů bude testována nejprve na kapacitní zátěži 3 nF až 4,5 nF. Po tomto testu bude stabilita zesilovačů dále testována při připojení UZ měniči.

5.2.5. Alternativní možné zapojení zesilovače

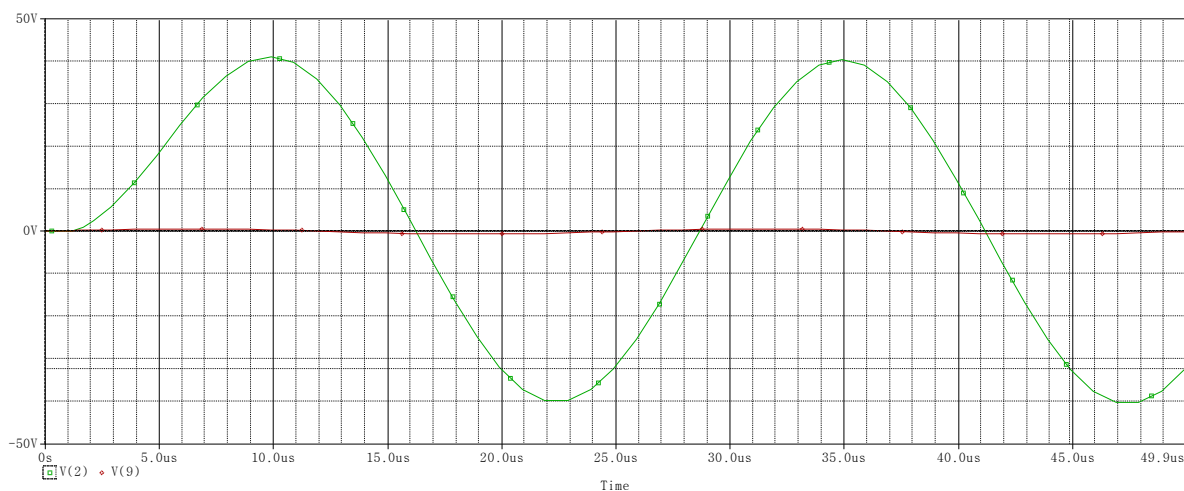
Možné jednodušší řešení zesilovače je použití zapojení neinvertujícího zesilovače s operačním zesilovačem OPA454 [3]:



Obr. 10 Schéma zapojení neinvertujícího zesilovače

V tomto případě by bylo výsledné zesílení zesilovače určeno vztahem (9). Amplituda výstupního signálu by tedy měla dosahovat hodnoty 65 V. Této hodnoty samozřejmě dosahovat nebude, protože je očekávána vysoká ztráta v obvodu.

Zapojení jednoduchého zesilovače OPA454 bylo simulováno v programu PSpice:



Obr. 11 Výsledky simulace zapojení neinvertujícího zesilovače

Zdrojový kód:

```
Mustkove zapojeni zesilovace
*
R1 1 0 1k
R2 1 2 100k
*vstupni signal: sinusovy prubeh, nulove pocatecni napeti, amplituda 0.65V (z datasheetu AD9833), frekvence 40kHz
V1 9 0 sin 0 0.65 40kHz
V2 7 0 50
V3 0 8 50
X1 9 1 7 8 2 10 11 12 OPA454
*uzemneni nepouzitych pinu
R5 10 0 300meg
R6 11 0 300meg
R7 12 0 300meg
*
.lib Knihovna.lib
.TRAN 1u 100u 0 1u SKIPBP
.PROBE V(9) V(2)
*iterace jsem zadal po 5000 protoze pri vychozim nastaveni program hlasil chybu
.OPTIONS ITL1=5000 ITL2=5000 ITL4=5000
*
.end
```

Obr. 12 Zdrojový kód pro simulaci zapojení neinvertujícího zesilovače

Z výsledků simulace plyne, že na výstupu zesilovače bude napětí 40 V, což je hodnota teoreticky použitelná pro vybuzení UZ měniče. Nepříjemné je, že oproti teoretickým předpokladům klesla amplituda napětí až o 38 %.

V porovnání s můstkovým zapojením má toto zapojení výhodu v menším množství použitých součástek, což samozřejmě sníží i cenu. Bohužel velkou nevýhodu má v tom, že jeho výstupní napětí je omezeno na 50 V (OPA454 podle simulací a [3] může dosáhnout na výstupu napětí rovno napájecímu napětí). Toto omezení je pro práci velmi nepříjemné, protože právě nalezení ideálního výstupního napětí je pro návrh analogové části UZMS velice důležité. Pro další práci bude tedy použito můstkové zapojení z důvodu vyššího dosažitelného napětí na měniči.

5.3. Zdroj +/- 50 V:

Jedná se o blok, který bude napájet operační zesilovače použité v zesilovačích. Bude použit zdroj dodán Ing. Jiřím Hofmanem (viz Obr. 13) a laboratorní zdroj DIAMETRAL P230R51D (viz Obr. 14).



Obr. 13 Zdroj +/- 50V

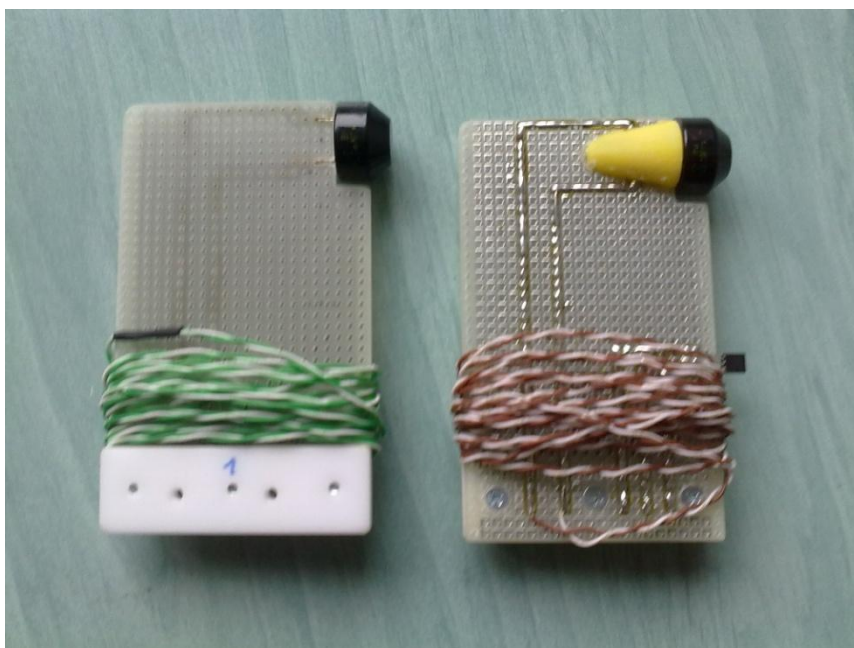


Obr. 14 Zdroj DIAMETRAL +/- 30V

5.4. Ultrazvukové měniče

Jedná se o zařízení, která změní elektrický signál ze zesilovače na signál akustický, který bude dalším tímto zařízením přijímán a přeměněn zpět na signál elektrický. Budou použity UZ měniče typu 400EP18A [5] (viz Obr. 15).

UZ měniče fungují na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev můžeme definovat jako elektrickou polarizaci krystalů vyvolanou mechanickou deformací. Převrácený piezoelektrický jev je charakterizován deformací krystalů působením přiloženého elektrického pole. Měníče při vysílání UZ signálu využívají převrácený piezoelektrický jev, kdy vlivem budícího střídavého napětí kolem dochází k oscilaci krystalu a generování zvukových vln. Při příjmu využívají měniče přímý piezoelektrický jev, kdy vlivem rozkmitání krystalu zvukovými vlnami dojde k elektrické polarizaci krystalu a generaci elektrického signálu. Problematika piezoelektrického jevu je podrobněji popsána v [8].



Obr. 15 UZ měniče typu 400EP18A

5.5. Přijímač

Bude sestaven zapojením přístrojového zesilovače, komparátoru a zdroje referenčního signálu. Přístrojový zesilovač nám zesílí signál přijímaný UZ měničem. Komparátor bude komparovat signál z přístrojového zesilovače a zdroje referenčního signálu. Jeho výstupem bude digitální signál.

5.5.1. Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač je zesilovač, který zesiluje rozdíl napětí přivedený na jeho vstupy – je to tedy diferenční zesilovač. Na rozdíl od klasického diferenčního zesilovače má velký (nekonečný) vstupní odpor. Vyznačují se vysokou přesností a jsou tedy velmi vhodné pro měřicí a testovací zařízení. Podrobnější informace o přístrojových zesilovačích lze nalézt v [9].

Některé tyto zesilovače mají zabudovanou ochranu proti vysokému napětí, konkrétně u přístrojových zesilovačů firmy Texas Instruments se jedná o ochranu až do vstupních napětí $\pm 40\text{V}$. Tato ochrana zajistí, že přijímač nebude poškozen, když bude měnič v režimu vysílání a na vstupech přijímače bude výstupní signál zesilovače. Při příjmu signálu měničem musí být výstupní signál zesilovače odpojen, jinak by na vstupu přijímače byl i tento signál.

5.5.2. Zdroj referenčního signálu

Jako zdroj referenčního signálu bude použita zem. V případě že bude tento zdroj nedostatečný, může být jako zdroj referenčního DA převodník, který bude generovat referenční signál. Signál ze zdroje referenčního signálu bude komparován s výstupním signálem přístrojového zesilovače pomocí komparátoru.

5.5.3. Komparátor

Komparátor je zařízení, které porovnává dva vstupní signály a přivádí na výstup různé hodnoty napětí v závislosti na tom, který ze vstupních signálů je větší.

Tato práce bude vyžadovat komparátor, který bude mít možnost vyprodukovat digitální signál kompatibilní s CMOS 3,3 V. Toho bude dosaženo tak, že bude výstupní signál přístrojového zesilovače a signál ze zdroje referenčního signálu. V případě, že bude jako referenční signál použita zem, dostaneme na výstupu logickou jedničku, pokud bude signál z přístrojového zesilovače v kladné půlvlňě a logickou nulu, pokud bude tento signál v záporné půlvlňě.

6. Testování zařízení

Testování bylo provedeno v laboratoři poskytnuté vedoucím práce doc. Ing. Jiřím Vaňkem, Ph.D, který dále poskytl k měření laboratorní generátor TESLA BK124-RC, osciloskop Agilent DSO3102A [13] a laboratorní zdroj DIAMETRAL P230R51D.

Nejdříve byly provedeny testy zesilovače pomocí laboratorního generátoru s výstupem odpovídajícím výstupu DDS generátoru [4]. Dále byla testována stabilita zesilovače při připojené kapacitní zátěži, a to od hodnot naměřených na UZ měničích v [1] až do jejich 1,5 násobku (tedy 3 nF až 4,5 nF). Nakonec byla stabilita zesilovače testována ještě při připojení UZ měniči. Další test byl test vypnutí zesilovače. Dále bude testován přenos signálu UZ měniči, kde se měřilo výstupní napětí UZ měniče v režimu příjmu pro různé budící frekvence, vzdálenosti a prostředí UZ měničů.

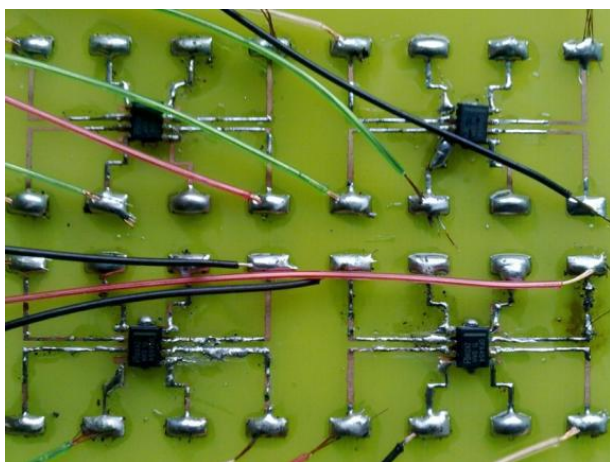
Z těchto výsledků bude v budoucnu proveden výběr optimálního přístrojového zesilovače, komparátoru a zdroje referenčního signálu pro přijímač. Dále bude sestaven prototyp přijímače. Tento prototyp bude zkoušen buzením z laboratorního generátoru s amplitudou odpovídající předchozím výsledkům měření výstupu UZ měniče v režimu příjmu. Digitální výstup by měl být synchronní se vstupním napětím.

Dále bude testován celý systém v jednom směru. Tedy zapojení DDS generátoru, zesilovače, UZ měniče, druhého UZ měniče, přijímače a osciloskopu. Nakonec budou provedeny testy obousměrného provozu (před nimi bude ještě vyzkoušen přijímač v režimu zpětné vazby, tedy při připojení na zesilovač a UZ měnič v režimu vysílání).

6.1. Testování zesilovače

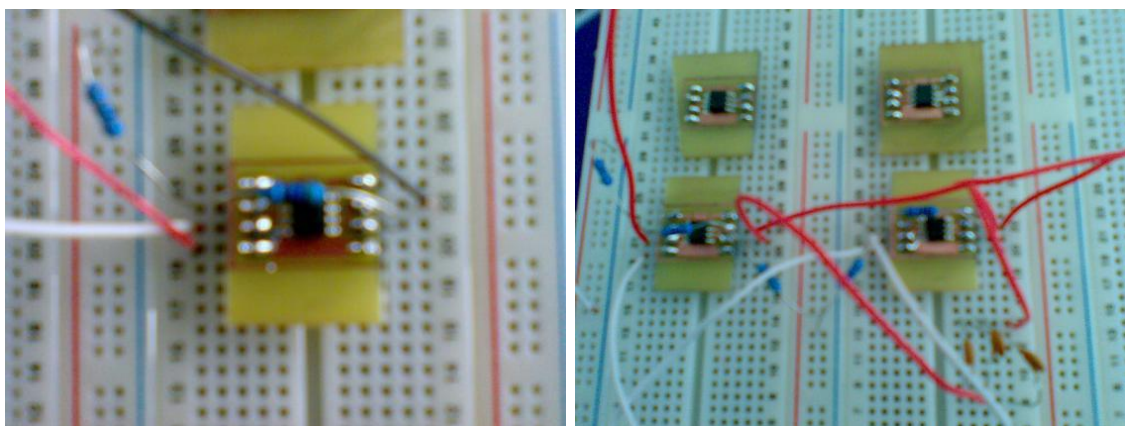
6.1.1 Způsob testování

Zesilovač byl testován s použitím nepájivého kontaktního pole. Pro zapojení zesilovačů OPA454, balených v SOIC pouzdrech byla vyrobena testovací DPS pro jejich zapojení do pole (Obr. 16).



Obr. 16 DPS pro zapojení OPA454 do pole

Tato testovací DPS byla dále nahrazena jinými testovacími deskami, z důvodu podezření na špatné zapájení a také komplikovaného zapojování do pole. Nové DPS byly konstruovány pro každý OZ samostatně a na pole byly kontaktovány pomocí oboustranných kolíků (Obr. 17).



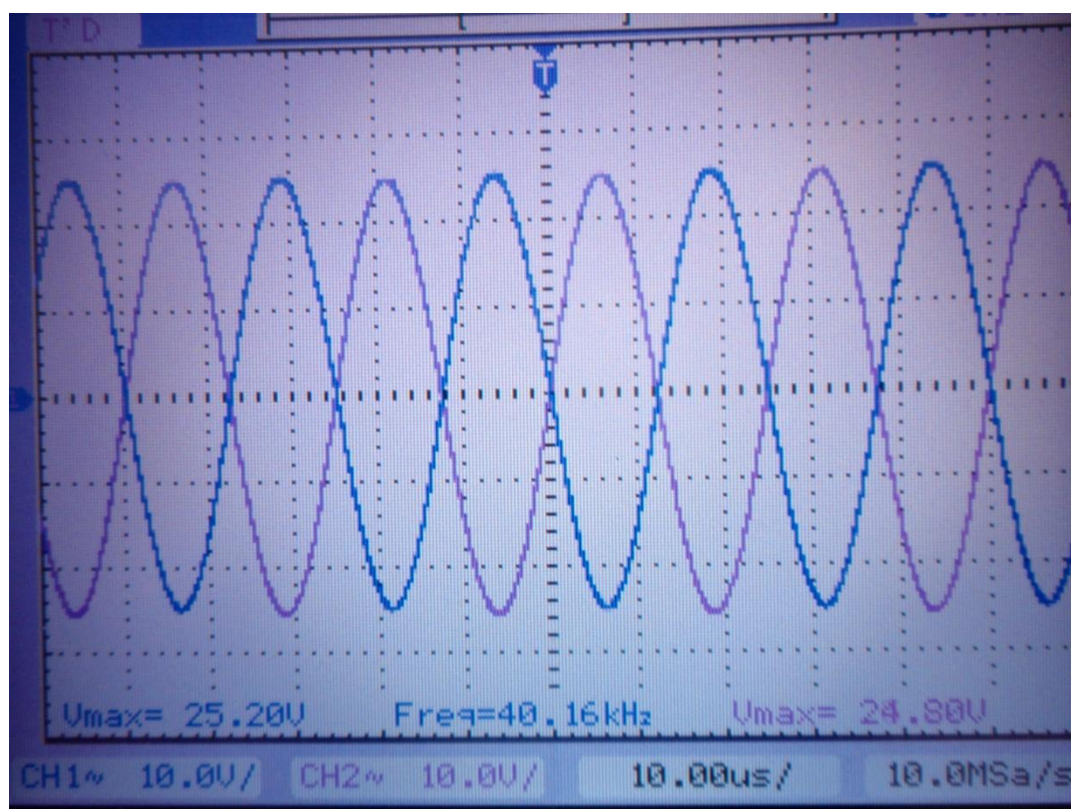
Obr. 17 Nové DPS pro zapojení OPA454 do pole

Ostatní součástky potřebné pro testování zesilovače (rezistory, kondenzátory) byly pořízeny v THT provedení.

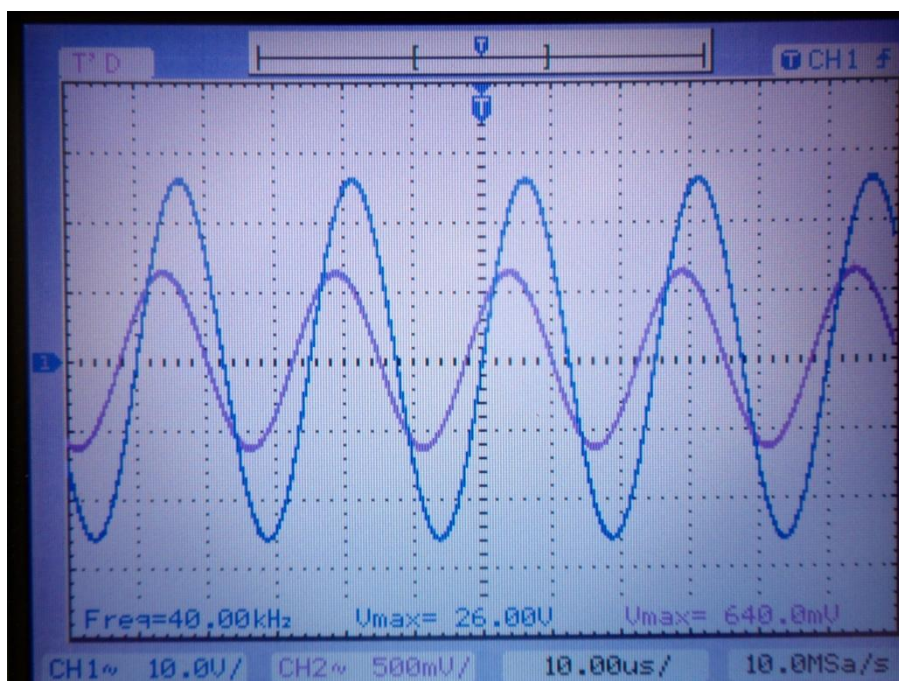
Výsledky testování byly zaznamenány ve formě fotografií výstupu osciloskopu.

6.1.2 Testy nezatíženého zesilovače laboratorním generátorem

Zapojení zesilovače podle Obr. 5 dosáhlo v praktickém měření menší amplitudy výstupu než v simulaci, proto byl rezistor R2 (původně 47 k Ω) vyměněn za rezistor s hodnotou 51 k Ω . Takto bylo dosaženo přijatelné hodnoty výstupu zesilovače, a to ± 25 V. Oproti simulaci je tato hodnota pouze asi o 7 % nižší. Výstup zesilovače je na Obr. 18 (invertující+neinvertující část) a na Obr. 19 (neinvertující část+vstupní signál).



Obr. 18 Výstup zesilovače (invertující+neinvertující část)



Obr. 19 Výstup zesilovače (neinvertující část+vstupní signál)

6.1.3 Testy zatíženého zesilovače laboratorním generátorem

Tyto testy se zabývají zjištěním, zda bude zesilovač stabilní i při kapacitní zátěži odpovídající kapacitě UZ měniče. Podle [1] je kapacita UZ měničů asi 3nF, toto měření proměřilo stabilitu zesilovače až do hodnoty zátěže 4.5 nF. Výsledky byly uspokojivé jak pro zatížení 3 nF kapacitou (Obr. 28 v příloze), 4.5 nF kapacitou (Obr. 29 v příloze), tak i pro zatížení UZ měničem (Obr. 30 v příloze).

6.1.4 Testy vypnutí zesilovače

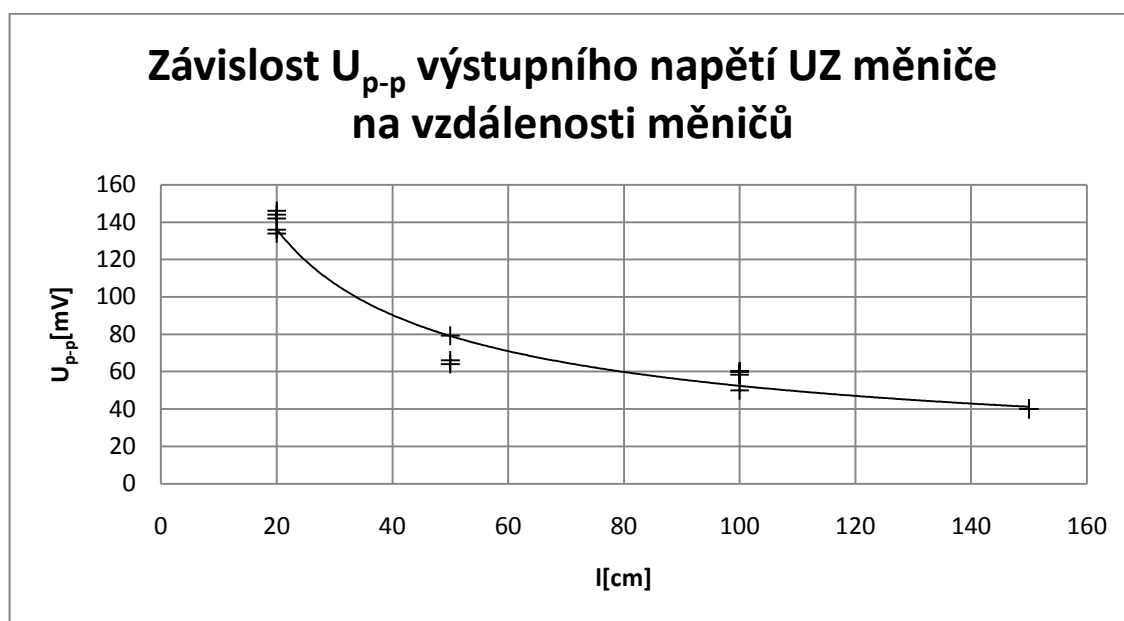
Pro funkci UZMS je velmi důležitá funkce vypnutí zesilovače, pomocí je třeba vypnout obvod zesilovače, když bude UZ měnič v režimu příjmu. Tohoto dosáhneme vypnutím OZ použitého v neinverující části můstkového zesilovače na Obr. 5. Testy vypnutí proběhly úspěšně (Obr. 31 v příloze), a to připojením V- na E/D pin OZ OPA454 [3].

6.2. Testování přenosu ultrazvukového signálu

V předchozí části byl vytvořen zesilovač, který byl dále použit k buzení UZ měniče. Tyto testy se zabývají měřením výstupních průběhů UZ měniče při různých podmínkách.

6.2.1 Měření přenosu signálu na různých vzdálenostech měničů

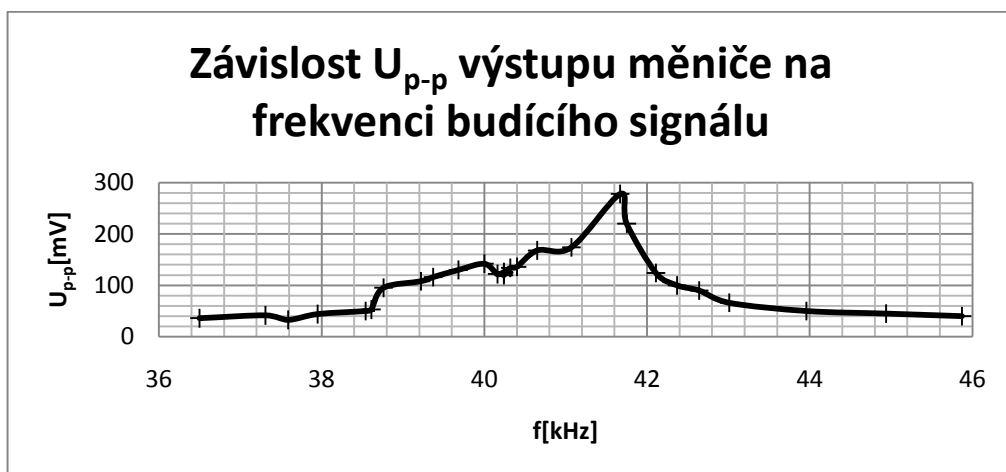
Tímto měřením byla proměřena závislost výstupního napětí UZ měničů na vzdálenosti. Měnič byl buzen signálem o frekvenci 40 kHz. Výstupní napětí podle očekávání s rostoucí vzdáleností rychle klesalo (Obr. 20).



Obr. 20 Závislost U_{p-p} výstupního napětí UZ měniče na vzdálenosti měničů

6.2.2 Měření přenosu signálu na různých frekvencích

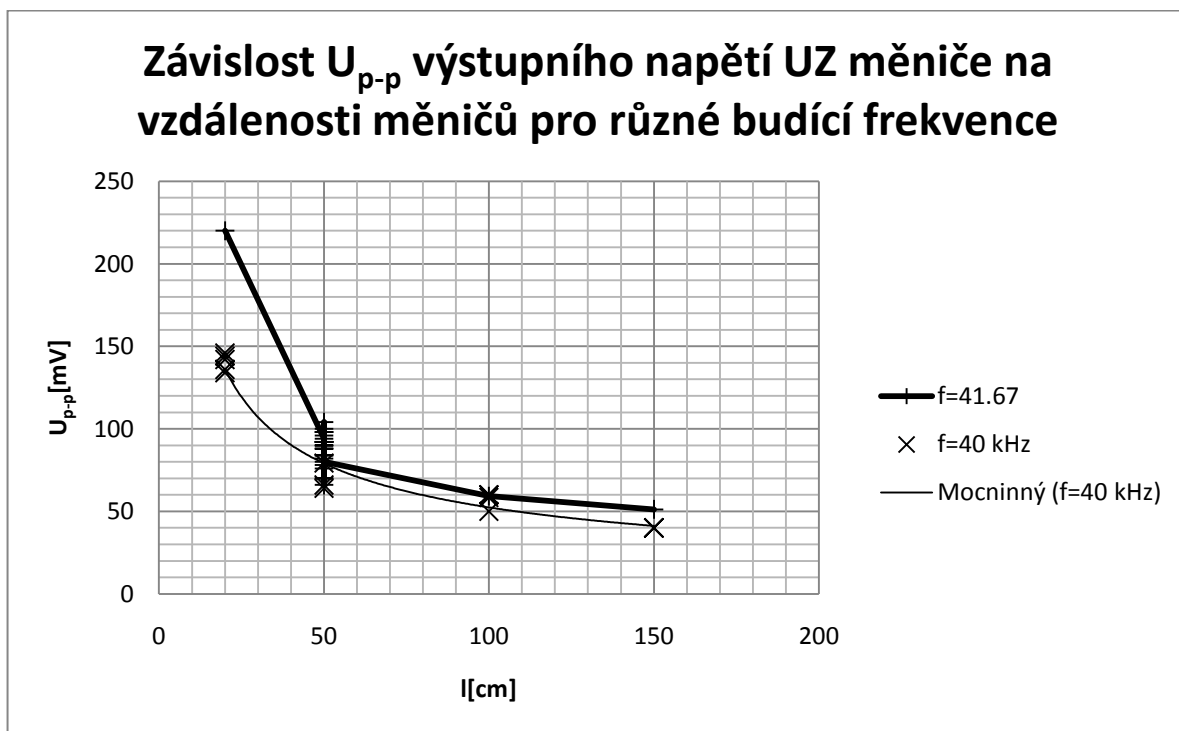
Zde je pozornost zaměřena na měření změny výstupního napětí UZ měniče se změnou frekvence. Měření bylo provedeno na vzdálenosti měničů $l=20$ cm. Výsledkem je, že budicí frekvence ovlivňuje výstupní napětí ve značné míře. Optimální budicí frekvence byla 41.67 kHz. Výstupní napětí bylo na této budicí frekvenci až o 49 % vyšší než na budicí frekvenci 40 kHz (viz Obr. 21).



Obr. 21 Závislost U_{p-p} výstupního napětí UZ měniče na budící frekvenci

6.2.3 Měření přenosu signálu pro frekvenci 41.67 kHz

Zde je již využito pro buzení měničů frekvence 41.67 kHz. Dle očekávání byly výsledky lepší než při použití frekvence 40 kHz. Pro porovnání je na Obr. 22 znázorněn graf výstupních napětí UZ měniče při těchto dvou budících frekvencích.

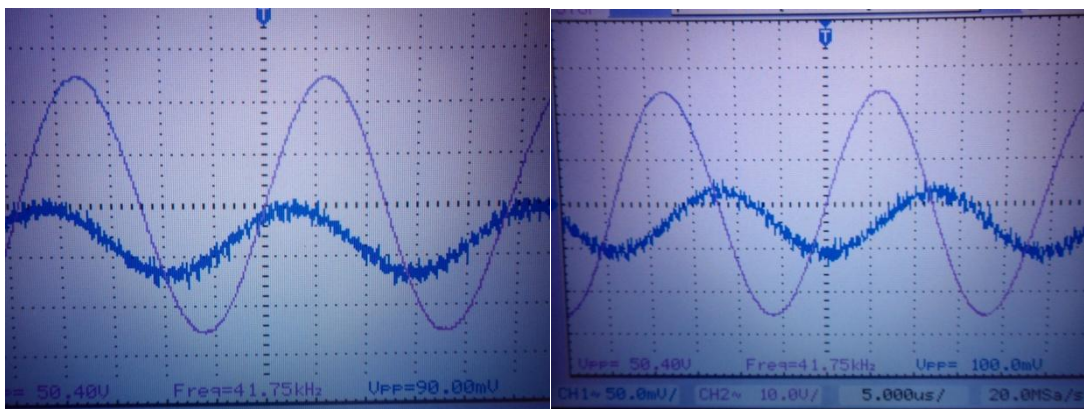


Obr. 22 Závislost U_{p-p} výstupního napětí UZ měniče na vzdálenosti měničů pro různé budící frekvence

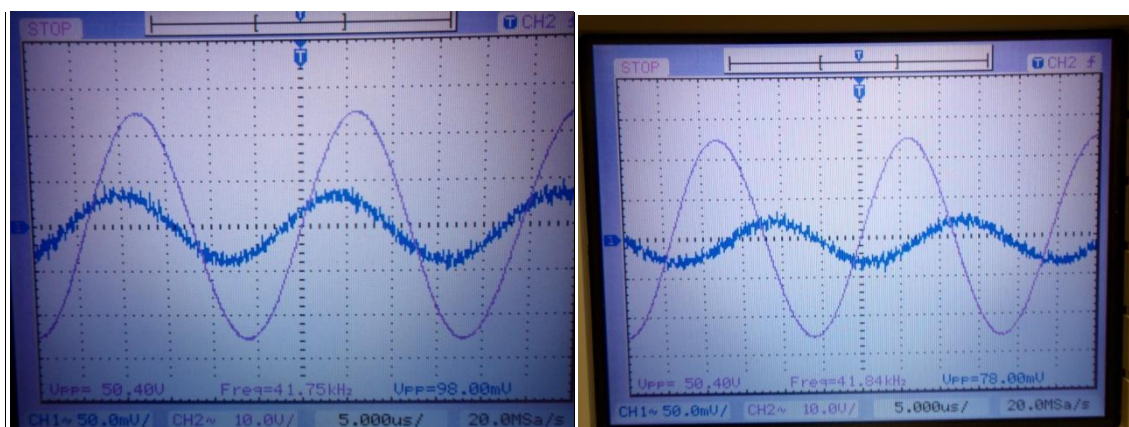
6.2.4 Testování vlivu proudícího větru na výstupní signál ultrazvukového měniče

Tyto testy byly provedeny s použitím větráku, kterým bylo foukáno mezi měniče. Nejdříve byl využit vítr stupně 2 jako protivítr (větrák měl 3 stupně síly proudění). Výstupní signál byl zpožděn asi o 17 μs (na Obr. 23 lze vidět nalevo výstupní signál pro bezvětrí, napravo pak za působení větru). Dále byl tento pokus opakován při použití větru stupně 1 jako protivětru. Zde bylo naměřeno zpoždění 15 μs (na Obr. 24 lze vidět nalevo výstupní signál pro bezvětrí, napravo pak za působení větru). Nakonec bylo ještě provedeno měření při použití větráku stupně 2 jako podpůrného větru. Tady bylo naměřeno předbíhání signálu o 17 μs (na Obr. 25 lze vidět nalevo výstupní signál pro bezvětrí, napravo pak za působení větru).

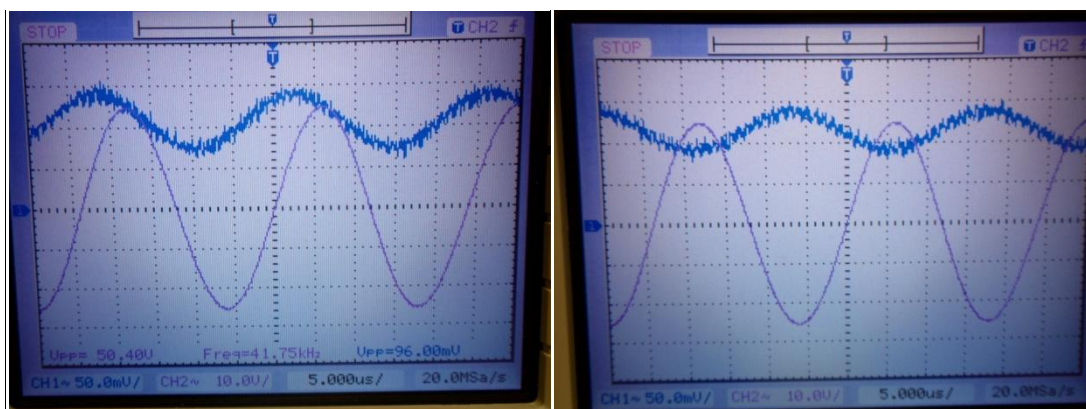
Z výsledků vidíme, že proudící vzduch má na výstupní signál UZ měniče dobře měřitelný vliv.



Obr. 23 Zpoždění výstupního signálu při použití větráku na 2. stupni jako protivítr (nalevo je signál v bezvětrí, napravo signál při použití větráku, CH1 je výstupní signál UZ měniče, CH2 budící signál UZ měniče)



Obr. 24 Zpoždění výstupního signálu při použití větráku na 1. stupni jako protivítr (nalevo je signál v bezvětrí, napravo signál při použití větráku, CH1 je výstupní signál UZ měniče, CH2 budící signál UZ měniče)



Obr. 25 Zpoždění výstupního signálu při použití větráku na 2. stupni jako podpůrný vítr (nalevo je signál v bezvětrí, napravo signál při použití větráku, CH1 je výstupní signál UZ měniče, CH2 budící signál UZ měniče)

6.2.5 Výpočet rychlosti proudění vzduchu

Naměřené hodnoty využijeme k ověření, zda nám výpočet rychlosti proudění vzduchu podle rovnice (8) poskytne reálnou hodnotu rychlosti proudění (zda jsou naměřené hodnoty proudění řádově správné, tedy v desítkách km/h). K výpočtu doby přenosu signálu bude použita orientační hodnota rychlosti zvuku 330 m/s. V konečném provedení bude doba přenosu měřena automaticky měřením zpoždění výstupního signálu UZ měniče v porovnání s jeho budícím signálem (získáme tedy přesně t_1 i t_2 a rychlost zvuku nebude třeba znát).

$$v_a = \frac{1}{2} * \left(\frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} \right)$$

Pro výpočet pomocí (8) musíme znát doby t_1 a t_2 . Ty přibližně určíme výpočtem pomocí (11) a (12), kde čas t_1 určíme odečtením naměřeného zpoždění od předpokládaného času v bezvětrí t_b a čas t_2 určíme přičtením naměřeného předbíhání k času v bezvětrí. Čas v bezvětrí určíme přibližně pomocí (10).

$$t_b = \frac{l}{v} = \frac{0.2}{330} = 606 \mu s \quad (10)$$

$$t_1 = t_b - 17 \mu = 606 \mu - 17 \mu = 589 \mu s \quad (11)$$

$$t_2 = t_b + 17 \mu = 606 \mu + 17 \mu = 623 \mu s \quad (11)$$

Nyní již máme všechny hodnoty potřebné pro výpočet rychlosti proudění v_a podle (8).

$$v_a = \frac{1}{2} * \left(\frac{0.2}{589 \mu} - \frac{0.2}{623 \mu} \right) = 9.27 m/s = 33.36 km/h$$

Tato hodnota odpovídá podle Beaufortovy stupnice síly větru stupni „čerstvý vítr“, který větrák velmi pravděpodobně i generoval.

7. Možné chyby měřicího systému

MS musí být velmi přesný, proto se práce zabývá analýzou možných zdrojů chyb a jejich minimalizací. Požadovaná celková nejistota měření je 0,1 m/s.

Některé možné chyby MS byly již určeny v [1] a u chyb, kde to bylo možné, byly provedeny i numerické simulace. Jednalo se o ovlivnění proudění vzduchu umístěnými snímači, chybu frekvence oscilátoru, chyby vzdálenosti UZ měničů a chyby UZ měničů. Výsledkem bylo, že frekvence oscilátoru při dané teplotě a vlivy parazitních vlastností UZ měničů bude možné kalibrovat v laboratoři pomocí přesného čítače a teplotní komory, vzdálenost UZ měničů při dané teplotě výpočtem kalibrační konstanty UZMS pomocí etalonu a ovlivnění proudění vzduchu snímači půjde snížit instalací aerodynamických držáků na snímače.

8. Závěr

Cílem bakalářské práce *Ultrazvukový měřicí systém pro analýzu proudění vzduchu v okolí fotovoltického panelu* bylo navrhnout a realizovat inteligentní měřicí modul pro experimentální měření proudění vzduchu kolem folotovoltického panelu pomocí ultrazvuku. Dále měly být na navrhovaném prototypu modulu provedeny analýzy experimentálních dat, získaných při laboratorních testech a dále při experimentech na venkovní instalaci panelu.

Toto zadání bylo splněno pouze částečně, protože modul nebyl z časových a obsahových důvodů realizován kompletně. Experimenty na venkovní instalaci panelu s částečně sestaveným prototypem nebylo možné provést. Nicméně získané laboratorní výsledky jsou velmi slibné a modul bude dokončen v rámci magisterského studia autora.

V práci je uvedena základní problematika FV panelů, měření proudění vzduchu a problematika ultrazvuku. Dále byl navržen a vytvořen funkční zesilovač pro buzení UZ měničů zadaným generátorem [4]. Byly také proměřeny výstupní průběhy UZ měničů a jejich závislosti na změně základních parametrů přenosu. Díky těmto měřením byl zvolen vhodný budicí signál. Dále se povedlo naměřit zpoždění/zrychlení signálu při působení proudění vzduchu. Z těchto naměřených zpoždění byla úspěšně přibližně určena rychlost proudění vzduchu.

Časově nejvíce náročnou částí práce byla realizace zesilovače. V průběhu jeho stavby se vyskytlo několik problémů, které byly ale nakonec zdárně vyřešeny.

9. Seznam literatury

- [1] HOFMAN, J. *Monitorovací systém vlivu proudění vzduchu na funkci fotovoltaického panelu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [2] HOFMAN, J. *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [3] *Texas Instruments* [online]. 2007, 2008 [cit. 2010-12-13]. Katalogový list operačního zesilovače opa454. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa454.pdf>>
- [4] *Analog Devices* [online]. 2010 [cit. 2010-12-13]. Katalogový list DDS generátoru AD9833. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9833.pdf>
- [5] *Farnell* [online]. 2010 [cit. 2010-12-13]. Katalogový list UZ měničů 400EP18A. Dostupné z WWW: <<http://www.farnell.com/datasheets/524508.pdf>>
- [6] HOFMAN, J. *Detailní technické zadání bakalářské práce*. Brno, 2010
- [7] E. A. Dean: *Atmospheric effects on the speed of sound*, University of Texas at El Paso, 1979
- [8] KAZELLE, J., HAVLÍČEK, S., JIRÁK, J., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., VANĚK, J. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy, elektronické texty*. Brno: 2003. s. 1-272. ISBN: ETE 101.
- [9] BIOLEK, D.; HÁJEK, K.; KRTIČKA, A. *Analogové elektronické obvody - přednášky*. Analogové elektronické obvody - přednášky. [Skriptum]. Brno: FEKT VUT Brno, 2007. s. 1-264. ISBN: MEL 07-030.

- [10] *Texas Instruments* [online]. 2008 [cit. 2010-5-18]. Katalogový list operačního zesilovače opa547. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa547.pdf>>
- [11] *Texas Instruments* [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. PSpice model OPA454. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/litv/zip/sboc274>>
- [12] *Texas Instruments* [online]. 1997 [cit. 2010-5-30]. PSpice model OPA547. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/litv/zip/sbom087>>
- [13] *Agilent Technologies* [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. Katalogový list osciloskopu Agilent DSO3102A. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-2235EN.pdf>>
- [14] Křepelka, Pavel. *Ultrazvukový anemometr*. Diplomová práce FEKT – VUT v Brně, 2011, 68s. Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [15] Pouč, P.: *Měření rychlosti šíření ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2009. Počet stran 89. Počet stran příloh 15. Diplomová práce. Vedoucím práce byl Ing. Radovan Jiřík, Ph.D.
- [16] ONDRACZKA, L. *Ultrazvukový měřicí systém pro analýzu proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 23 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

10. Seznam zkratek

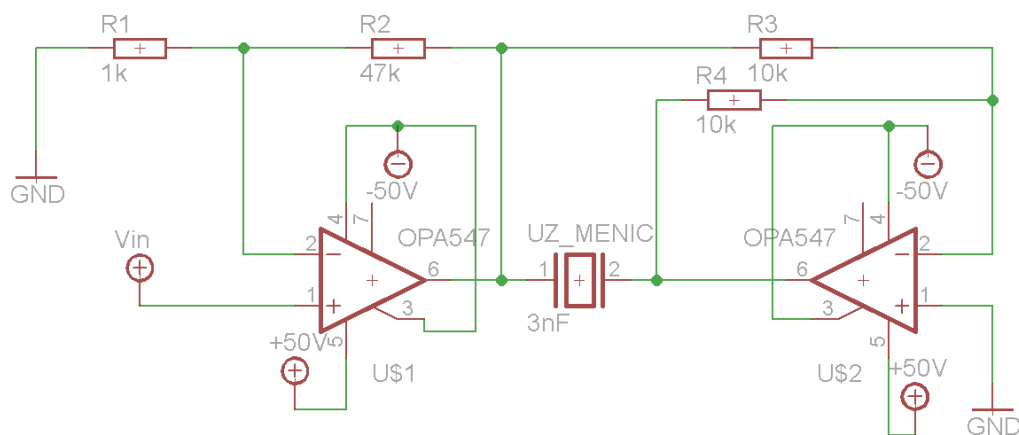
| | |
|-------------|---|
| BP | Bakalářská Práce |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor |
| DA | Digitálně-Analogový |
| DDS | Direct Digital Synthesizer |
| FP | Fotovoltaický Panel |
| FV | Fotovoltaika |
| MS | Měřicí Systém |
| OZ | Operační zesilovač |
| PC | Personal Computer |
| PV | Photovoltaic |
| UMS | Univerzální Měřicí Software |
| UZ | Ultrazvuk |
| UZMS | Ultrazvukový Měřicí Systém |

11. Přílohy

11.1. Simulace můstkového zapojení s OPA547 v PSpice

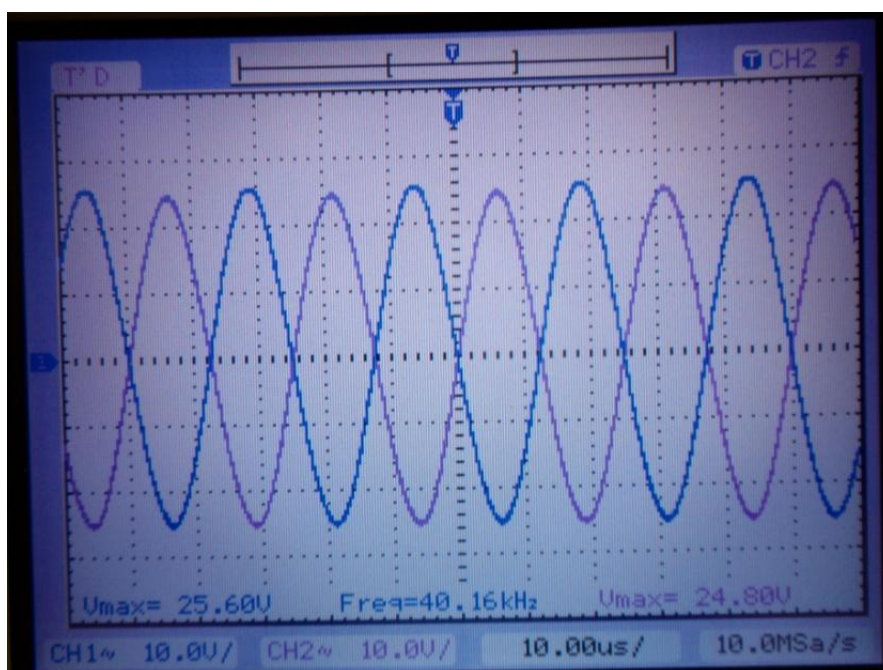
```
Mustkove zapojeni zesilovace s opa547
*
R1 1 0 1k
R2 1 2 47k
R3 2 3 10k
R4 3 4 10k
*vstupni signal: sinusovy prubeh, nulove pocatecni napeti, amplituda 0.65V (z [4]), frekvence 40kHz
V1 9 0 sin 0 0.65 40kHz
V2 7 0 30
V3 0 8 30
V4 5 0 30
V5 0 6 30
X1 9 1 8 8 7 2 10 OPA547
X2 0 3 6 6 5 4 11 OPA547
*UZ menice jsem nahradil kondenzatorem o kapacite 3nF, na zaklade udaje v [1]
C1 4 2 3n
*uzemneni nepouzitych pinu
R5 10 0 300meg
R6 11 0 300meg
*
.lib Knihovna.lib
.TRAN 1u 100u 0 1u SKIPBP
.PROBE V(9) V(2) V(4)
*iterace jsem zadal po 5000 protoze pri vychozim nastaveni program hlasi chybu
.OPTIONS ITL1=5000 ITL2=5000 ITL4=5000
*
.end
```

Obr. 26 Zdrojový kód pro simulaci můstkového zapojení s OPA547

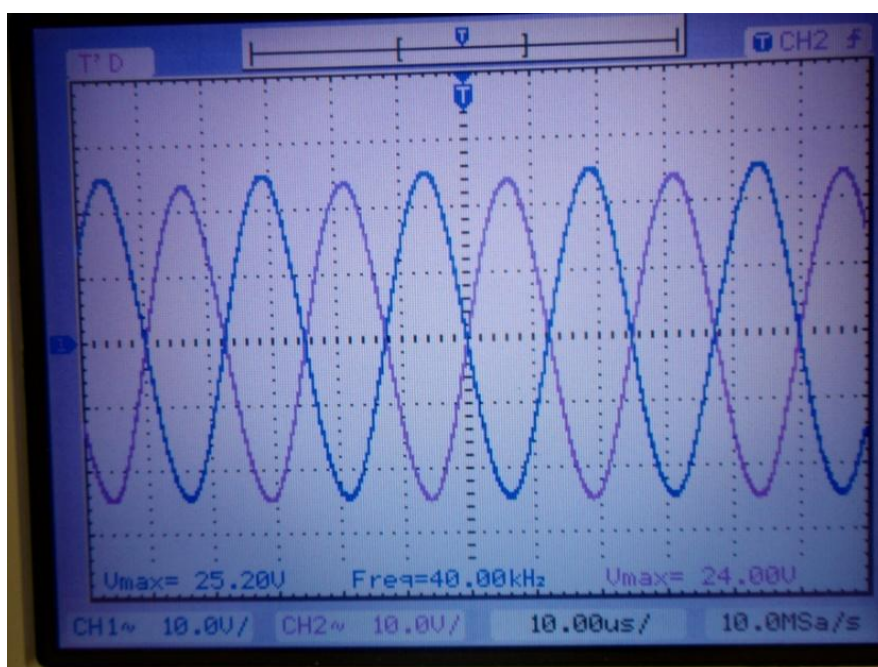


Obr. 27 Schéma můstkového zapojení s OPA547

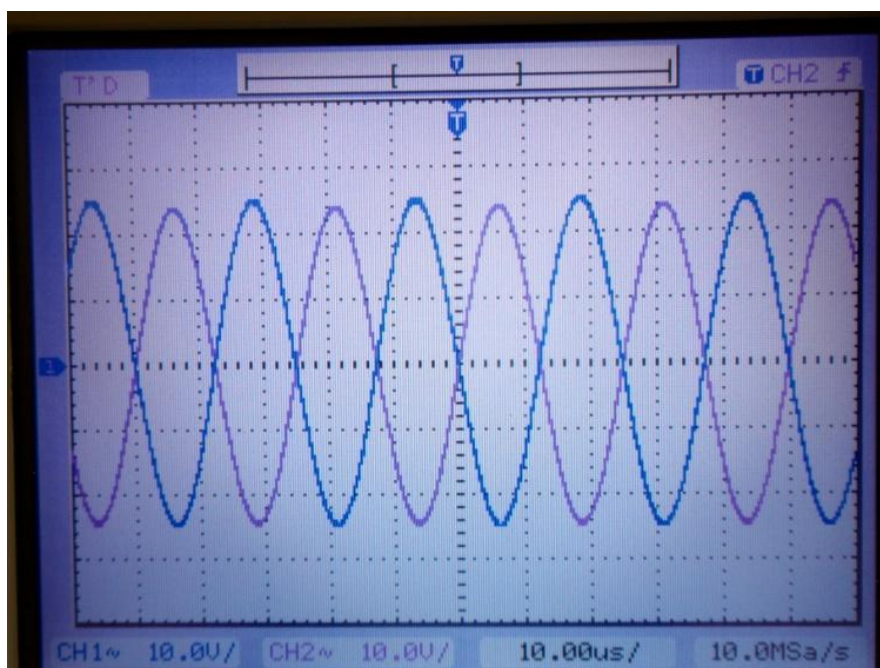
11.2. Testy zesilovače



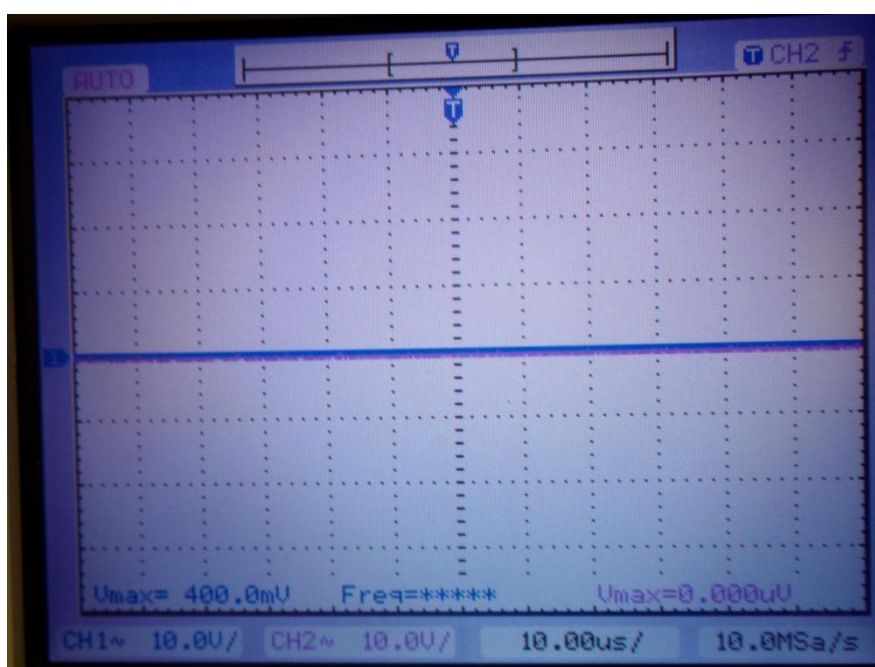
Obr. 28 Výstup zesilovače při kapacitní zátěži 3 nF



Obr. 29 Výstup zesilovače při kapacitní zátěži 4.5 nF



Obr. 30 Výstup zesilovače při zatížení UZ měničem



Obr. 31 Test vypnutí zesilovače